

V. La stratigraphie et l'échelle des temps géologiques

V.1. Définitions

La **stratigraphie** (du latin *stratum*, « couche », et du grec *graphein*, « écrire ») est la science qui étudie la succession, dans l'espace et dans le temps, des couches de terrains ou **strates** et des événements qu'elles ont enregistrés. Elle permet d'établir une chronologie stratigraphique relative et a pour objectif de retracer l'histoire de la Terre.

On appelle **strate** une couche de terrain homogène possédant une individualité nette. Son épaisseur peut varier de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres. Les strates sont séparées par des **joints de stratification** horizontaux. La strate est l'unité de base de la stratigraphie.

La **stratification** désigne la disposition de dépôts successifs et horizontaux de sédiments en couches ou strates.

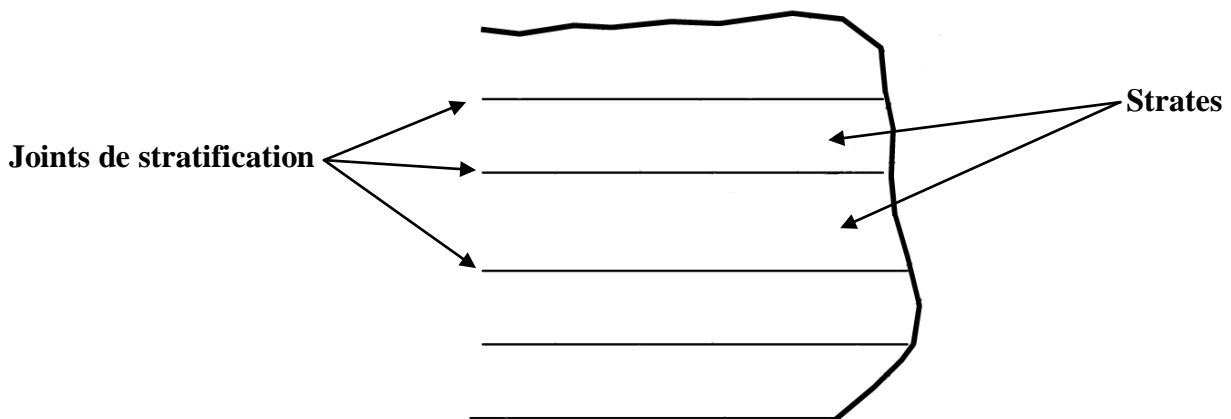


Figure 1 : Schéma représentant des strates séparées par des joints de stratification horizontaux.

V.2. Les principes de la stratigraphie

Les fondements de la stratigraphie et l'établissement de la datation ou chronologie relative se basent sur des principes simples, appelés principes de la stratigraphie.

V.2.1. Le principe de l'uniformitarisme

Le principe de l'uniformitarisme a été évoqué pour la première fois par James Hutton (1726-1796), qui en étudiant des roches en Ecosse avait conclu que les mêmes processus géologiques qui opèrent actuellement sur Terre sont ceux qui existaient dans le passé. Ce principe est souvent résumé par la phrase célèbre : « le présent est la clé du passé ». Dans sa version moderne, ce principe stipule que les lois de la nature n'ont pas varié au cours du temps, les lois physiques et chimiques actuelles étaient valides dans le passé de la Terre.

V.2.2. Le principe de la superposition (Nicolas Sténon, 1669)

Dans une succession de couches ou strates déposées à l'horizontale les unes sur les autres et non déformées ou renversées par la tectonique, la couche la plus ancienne est à la base et la plus jeune au sommet.

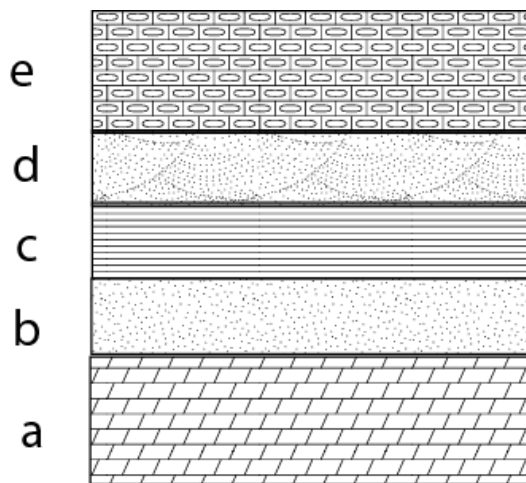


Figure 2 : Schéma du principe de superposition. La couche a est la plus ancienne, la couche e la plus jeune.

V.2.3. Le principe d'horizontalité primaire

Les couches sédimentaires se sont déposées horizontalement, parallèlement à la surface de la Terre. Une couche sédimentaire actuelle inclinée ou plissée a été déformée postérieurement à son dépôt.

V.2.4. Le principe de continuité

Une même couche a le même âge sur toute son étendue. Par exemple, les strates horizontales exposées de part et d'autre d'une vallée fluviale formaient des couches continues et ont ensuite été érodées par la rivière (figure 3).

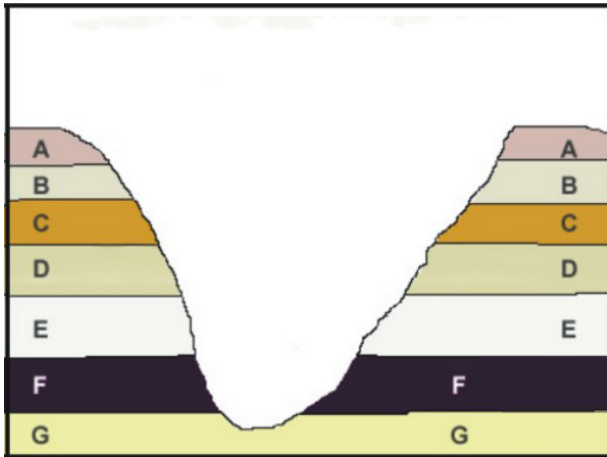
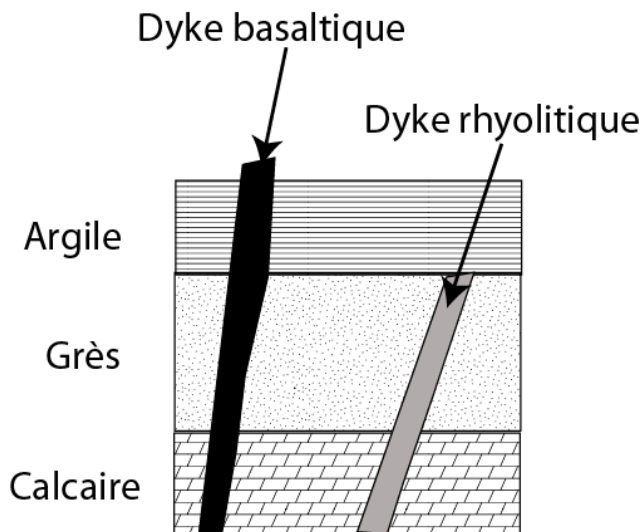


Figure 3 : Schéma illustrant le principe de continuité. Les strates sont corrélées de part et d'autre de la vallée fluviale

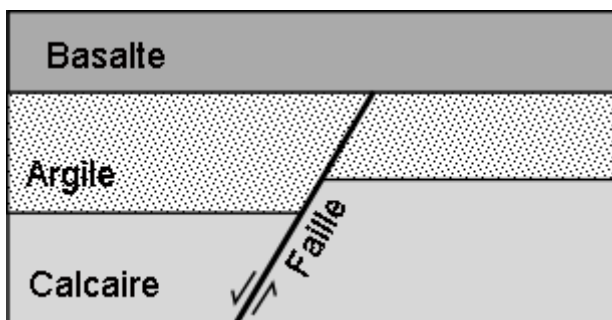
V.2.5. Le principe de recoupement

Les couches ou strates sont plus anciennes que les failles, dykes et roches qui les recoupent.



Dans l'exemple de la figure 4, le dyke basaltique recoupe les couches de calcaire, grès et argile. Sa mise en place est donc plus jeune que le dépôt des trois couches. Le dyke rhyolitique recoupe les couches de calcaire et de grès mais ne recoupe pas la couche d'argile. Il est donc plus jeune que la couche de calcaire et de grès. La couche d'argile est plus jeune que le dyke rhyolitique.

Figure 4 : premier schéma illustrant le principe de recoupement (cas de dykes).



Dans l'exemple de la figure 5, la faille recoupe la couche de calcaire et d'argile, mais ne recoupe pas le basalte. La faille est donc plus jeune que les couches de calcaire et d'argile, mais plus ancienne que le basalte.

Figure 5 : second schéma illustrant le principe de recoupement (cas d'une faille)

V.2.6. Le principe de l'inclusion

Un fragment de roche trouvé à l'intérieur d'une autre roche s'appelle **inclusion**. Si le fragment de roche est trouvé à l'intérieur d'une roche magmatique, on l'appelle **xénolite**. Dans les deux cas, les fragments de roche inclus dans une couche sont plus anciens que la couche.

Dans l'exemple de la figure 6, la coulée de basalte a arraché des fragments de grès en remontant à la surface. Elle est donc plus jeune que la couche de grès. De la même manière, la coulée de rhyolite contient en son sein des inclusions de basalte. Elle est donc plus jeune que la coulée de basalte.

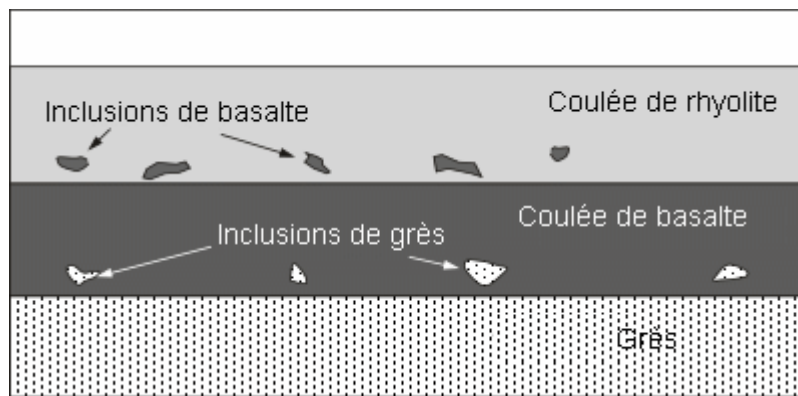


Figure 6 : schéma illustrant le principe de l'inclusion.

Le principe de l'inclusion peut être utilisé pour reconnaître si une couche de roche magmatique interstratifiée est un sill ou une coulée. Dans l'exemple de la figure 7, la couche basaltique contient des inclusions de grès sus-jacents et de rhyolite sous-jacente. Elle est donc plus jeune que la coulée de rhyolite et la couche de grès. C'est donc un sill, qui s'est mis en place entre la coulée de rhyolite et la couche de grès.

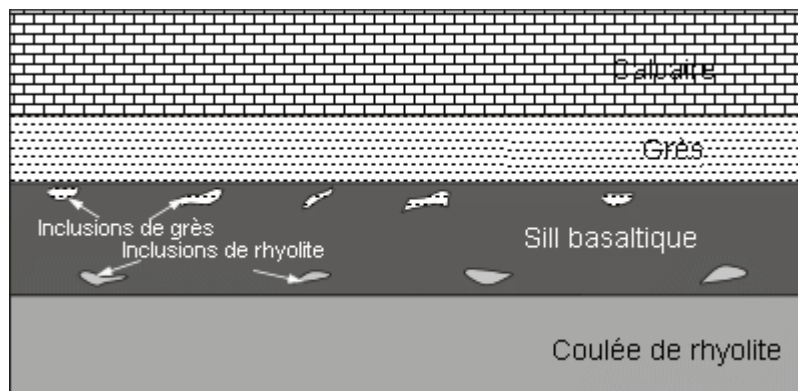


Figure 7 : schéma illustrant la détermination du mode de gisement d'une couche de roches magmatiques en utilisant le principe d'inclusion.

V.2.7. Le principe d'identité paléontologique

Ce principe stipule qu'un ensemble de strates de même contenu paléontologique (mêmes fossiles) est de même âge.

Pour l'application de ce principe, on définit la notion de « *fossiles stratigraphiques* » qui doivent avoir un certain nombre de caractères :

- Evolution rapide de l'espèce dans le temps (l'espèce doit avoir une courte période de vie sur Terre).
- Vaste répartition géographique.
- Grand nombre d'individus et grand potentiel de fossilisation.

V.2.8. Le principe de la succession des faunes

Ce principe stipule que les organismes fossiles se succèdent dans le temps dans un ordre défini et reconnaissable et que l'âge relatif des strates peut donc être déterminé à partir de leur contenu en fossiles.

V.3. Les discordances (prises ici dans le sens anglo-saxon « unconformity »)

V.3.1. Définitions

Une discordance est une surface d'érosion ou de non-dépôt séparant deux ensembles de strates. Elle représente l'intervalle de temps pendant lequel aucun sédiment n'a été conservé. Cet intervalle de temps est appelé *hiatus* ou *lacune*.

V.3.2. Différents types de discordances

a. Disconformité

Une disconformité est une discordance où les couches supérieures et inférieures sont parallèles et séparées par une surface irrégulière d'érosion. Après le dépôt, l'érosion enlève des couches, puis la sédimentation reprend sur la surface d'érosion (fig. 8).

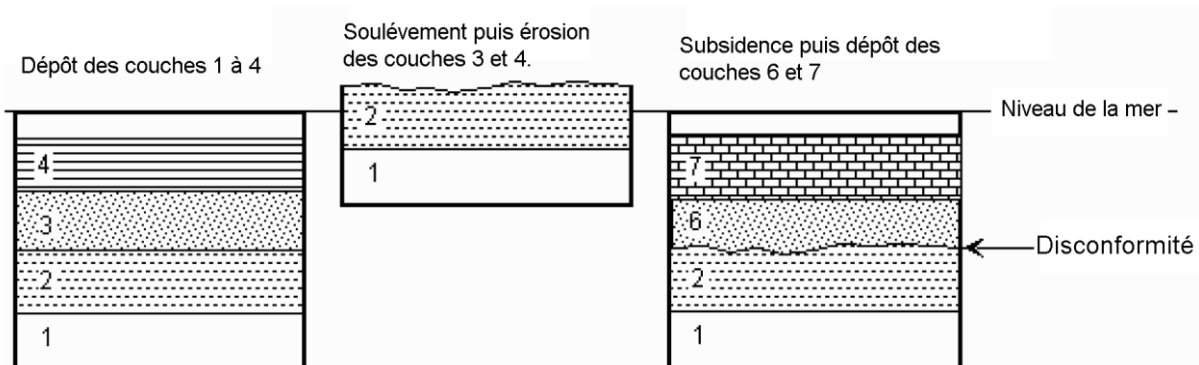


Figure 7 : Séquence d'événements conduisant à la formation d'une disconformité.

b. Non-conformité

Discordance où les couches supérieures (sédimentaires ou roches/sédiments volcaniques) recouvrent des roches métamorphiques ou magmatiques. On parle de non-conformité lorsque les couches supérieures se sont déposées sur une surface d'érosion au dessus de roches magmatiques ou métamorphiques (figure 8).

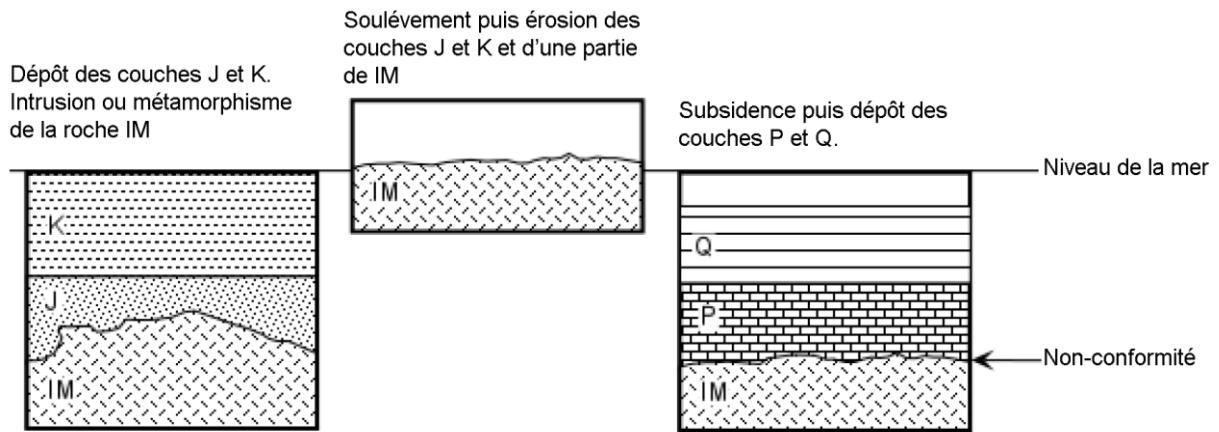


Figure 8 : Séquence d'événements conduisant à la formation d'une non-conformité.

c. Discordance angulaire

Une discordance angulaire se produit lorsqu'il y a interruption de la sédimentation, suivie d'une déformation (basculement ou plissement) et d'une érosion partielle (figure 9). La discordance s'observe entre les couches les plus anciennes déformées (basculées ou plissées) et celles plus récentes, horizontales. Une discordance angulaire existe donc entre deux couches superposées dont les pendages sont différents de part et d'autre de la surface de discordance.

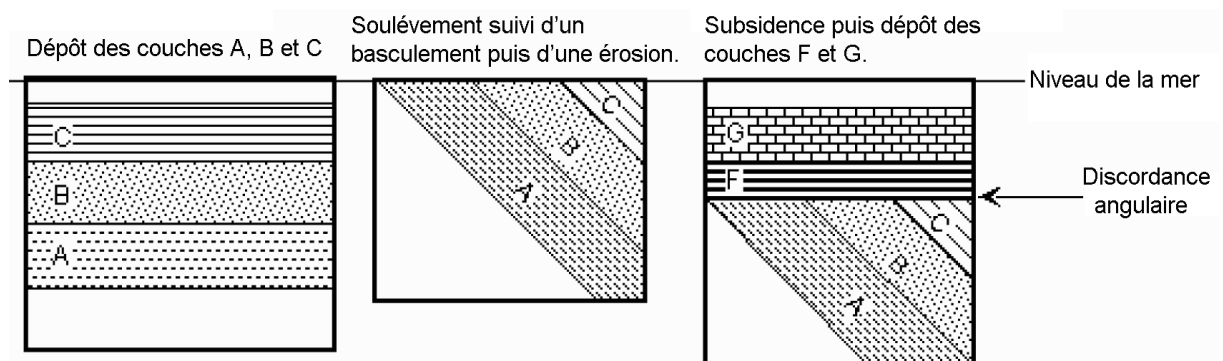


Figure 9 : Séquence d'événements conduisant à la formation d'une discordance angulaire.

d. Paraconformité

Discordance où les couches supérieures et inférieures sont parallèles et séparées par une surface plane ne présentant aucune apparence d'érosion. Très difficile à reconnaître, la discordance doit être établie par la différence d'âge des strates (figure 10).

Une bioturbation dans les couches situées juste au dessous de la surface de discordance peut être un indicateur d'une paraconformité (figure 11).

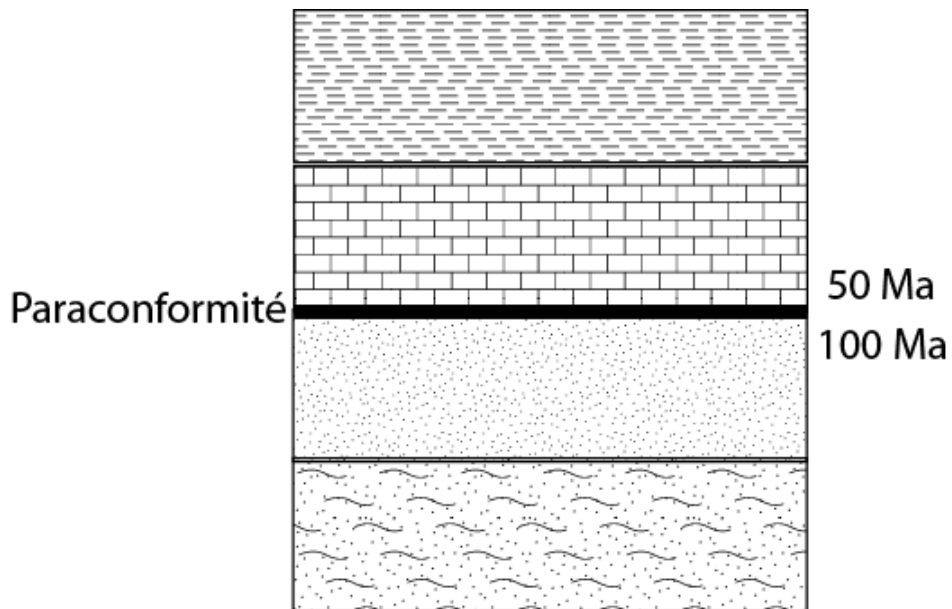


Figure 10 : Schéma montrant un exemple d'une paraconformité

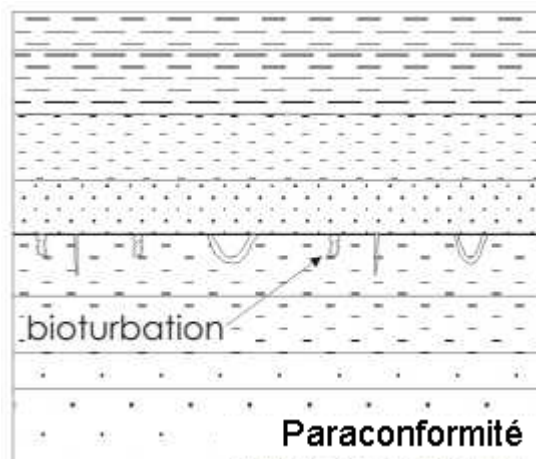


Figure 10 : Schéma d'une paraconformité avec une bioturbation affectant les couches situées juste au dessous de la surface de discordance.

V.4. La datation absolue et méthodes radiochronologiques

Les méthodes stratigraphiques vues précédemment permettent de donner un **âge relatif** aux roches. Pour donner un **âge absolu**, on utilise les méthodes radiochronologiques.

Les méthodes radiochronologiques sont basées sur la désintégration des éléments radioactifs. Soit un isotope radioactif Père (P) qui se désintègre en élément radiogénique fils (F). La quantité d'atomes de l'élément père (P) en un temps (t) est donné par l'équation exponentielle:

$$P = P_0 e^{-\lambda.t}$$

P_0 est la quantité de l'élément père au temps $t = 0$. λ est un coefficient de proportionnalité ($\lambda > 0$) appelé : constante de désintégration radioactive qui s'exprime en a^{-1} (inverse du temps).

On définit également **la période** d'un élément radioactif (T) ou demi-vie comme étant le laps de temps pendant lequel se désintègre la moitié de l'isotope radioactif.

$$T = \frac{\text{Ln}2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

La période est exprimée en unité de temps, en milliers, en millions ou en milliards d'années. Elle permet d'évaluer d'une manière simple la vitesse avec laquelle tel ou tel isotope radioactif se désintègre.

Si on démarre avec 1 gramme de l'isotope parent, il ne restera que 0,5 gr après une période d'1 demi-vie, 0,25 gr après une période de 2 demi-vie, et 0,125 gr après 3 demi-vie ... (figure 11).

Plusieurs méthodes radiochronologiques sont utilisées en géologie. Pour dater des matériaux jeunes, on utilise la méthode du Carbone-14 qui possède une période ou demi-vie très courte (à l'échelle des temps géologiques) : 5370 ans. Cette méthode est cependant limitée : elle ne peut pas être utilisée pour des roches ou matériaux dont l'âge est supérieur à 70000 ans, car au bout de cette période, pratiquement toute la quantité de l'élément père se sera transformée en élément fils. Par ailleurs, elle n'est applicable que pour des matériaux et roches contenant de la matière organiques. Pour dater des roches anciennes, on utilise des méthodes où la demi-vie de l'isotope père est grande. Cependant, ces méthodes ne peuvent être utilisées pour des matériaux très jeunes, car la quantité de l'élément fils accumulée durant une courte période sera négligeable et non mesurable avec les instruments. Par exemple, la méthode Rubidium 87 - Strontium 87 a une demi-vie de 47 Ga : elle ne peut pas être utilisée pour des roches dont l'âge est inférieure à 10 millions d'années.

Les principales méthodes radiochronologiques utilisées en géologie et leurs caractéristiques sont données dans le tableau 1.

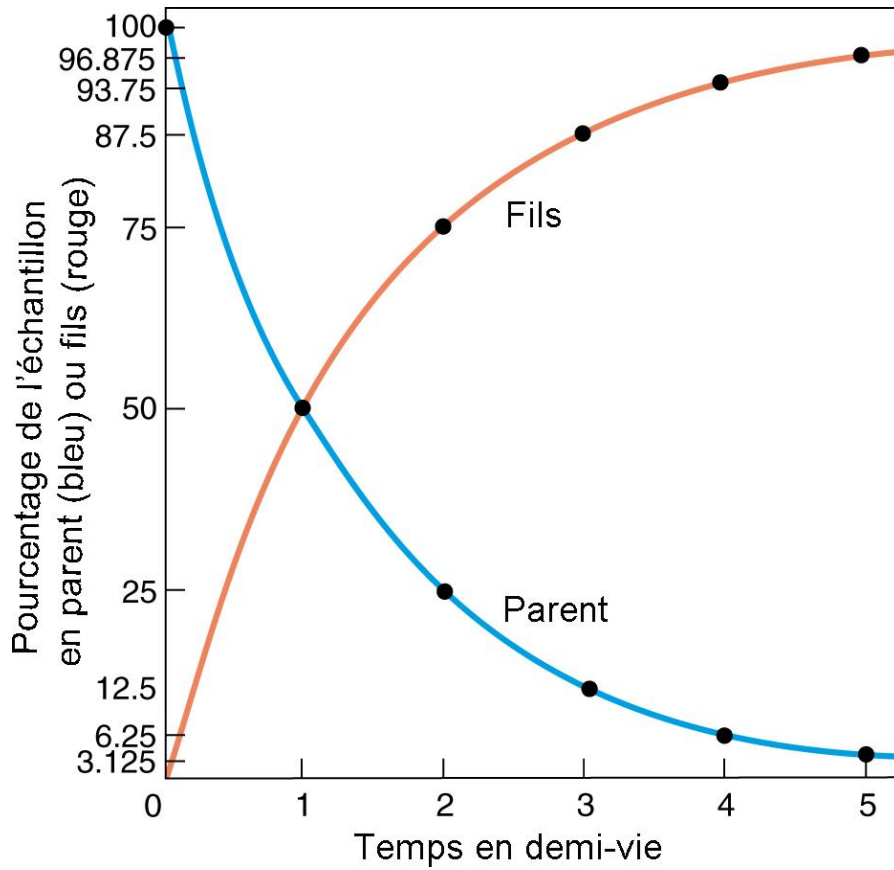


Figure 11 : Diagramme montrant la décroissance de l'isotope radioactif père et la croissance de l'isotope radiogénique fils.

Isotopes		Demi-vie ou période du parent (en années)	Intervalle de temps daté par la méthode	Type de matériel daté
Parent	Fils			
^{238}U	^{206}Pb	4,5 Ga	10 Ma - 4,6 Ga	Roches magmatiques et minéraux
^{40}K	$^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{Ca}$	1,3 Ga	50000 ans - 4,6 Ga	
^{87}Rb	^{87}Sr	47 Ga	10 Ma - 4,6 Ga	
^{14}C	^{14}N	5730 ans	100 ans - 70000 ans	Matière organique

Tableau 1 : principales méthodes radiochronologiques utilisées en géologie.

V.5. L'échelle des temps géologiques

Au cours des deux derniers siècles, les géologues ont réussi à réaliser des corrélations stratigraphiques de roches qui se sont accumulées tout au long des temps géologiques à travers le monde. Les résultats de ces études ont permis d'établir la colonne de **l'échelle des temps géologiques** (figure 12). Les géologues divisent les temps géologiques en unités. Tout comme une année est divisée en mois, les mois en semaine, et les semaines en jours, les unités des temps géologiques sont divisées en petits intervalles.

La plus grande unité des temps géologique est l'**éon**, qui est divisé en **ères**. Les ères sont subdivisées, à leur tour, en **périodes**, qui sont subdivisées en **époques**. La colonne de l'échelle des temps géologiques est basée sur des âges relatives. Lorsque les méthodes de datation géochronologiques ont été mises au point, les âges absolus ont été ajoutés à l'échelle des temps géologiques.

Les éons sont divisés en 4 parties (du plus ancien au plus récent) :

- L'**Hadéen** : très peu de roches de cette période existent à la surface de la Terre.
- L'**Archéen** (Anciennes roches).
- Le **Protérozoïque** (Proteros : premier, zoïque : vie - ce qui veut dire début de la vie)

Les trois divisions précédentes sont souvent regroupées sous le terme de : Précambrien (car elles précèdent la période du Cambrien où les formes de vie se sont diversifiées et les fossiles ont été bien conservés dans les roches).

- Le **Phanérozoïque** (qui veut dire vie apparente).

Notons que le phanérozoïque, qui représente les dernières 538 millions d'années de l'histoire de la Terre contient la plupart des subdivisions de l'échelle des temps géologiques. Le Précambrien, qui représente plus de 4 milliards d'années de l'histoire de la Terre, 8 fois plus long que le Phanérozoïque, ne présente pratiquement aucune subdivision. Ceci est dû au fait que les subdivisions des temps géologiques sont basées principalement sur les fossiles trouvés dans les roches. Ces derniers sont très rares dans les roches du Précambrien, et ne permettent pas de réaliser des subdivisions en son sein.

La subdivision des éons en ères ne concerne, sur l'échelle des temps géologiques, que le Phanérozoïque. On distingue, de la plus ancienne et à la plus récente :

- Le **Paléozoïque** (qui veut dire: vie ancienne).
- Le **Mésozoïque** (qui veut dire la vie moyenne, cette ère est aussi appelée l'âge des dinosaures)
- Le **Cénozoïque** (qui veut dire la vie récente, appelée aussi l'âge des mammifères).

Le Paléozoïque comprend les périodes suivantes:

- Le **Cambrien**.
- L'**Ordovicien** (qui a vu l'apparition des premiers organismes vertébrés : les poissons)
- Le **Silurien** (qui a vu l'apparition des premières plantes sur la terre ferme)
- Le **Dévonien** (apparition des premiers amphibiens)

- Le **Carbonifère** (apparition des premiers reptiles).
- Le **Permien**.

Le Mésozoïque comprend les périodes suivantes:

- Le **Trias** (apparition des premiers dinosaures)
- Le **Jurassique**.
- Le **Crétacé** (apparition des premiers mammifères. Cette période se termine par la disparition des Dinosaures).

Le Cénozoïque comprend les périodes suivantes:

- Le **Tertiaire**.
- Le **Quaternaire**.

Les subdivisions des périodes sont appelées : époques. Sur la colonne de la figure 12, seules les époques du Cénozoïque ont été indiquées (figure 12).

La période est l'unité de temps la plus utilisée par les géologues. Le nom des périodes fait souvent référence à la localité ou la région où les roches de cette période ont été décrites pour la première fois (exemple, le Jurassique qui fait référence au Jura, région de France). Elle peuvent faire référence aussi à une roche abondante de cette période (exemple, le Crétacé qui fait référence à la craie qui est abondante durant cette période, le mot Creta veut dire craie en latin).

Notons enfin que l'échelle des temps géologiques est régulièrement révisée et mise à jour.

V.6. L'âge de la Terre

Les plus anciennes roches sur Terre ont été datées à 4 milliards d'années (le **gneiss d'Acasta**, situés dans les Territoires du Nord-Ouest au Canada, est daté à **4,03 milliards d'années**).

Des grains minéraux de zircons trouvés en Australie sont encore plus anciens. Ils proviennent de la formation de Jack Hills et ont été daté à **4,404 milliards d'années**. Il s'agit du plus ancien matériel daté sur Terre. Mais il s'agit là de minéraux et non pas de roches : les roches mères qui contenaient ces zircons ont été probablement détruites.

Il est peu probable de trouver sur Terre des roches plus vieilles que 4 milliards d'années. Pour remonter à l'âge de la Terre, on utilise les météorites, qui sont les matériaux de base à partir desquels se sont formées les planètes du Système solaire. La majorité des météorites qui tombent sur Terre proviennent de la ceinture des astéroïdes, située entre les planètes Mars et Jupiter. L'âge le plus ancien obtenu sur des minéraux de météorites est de **4,566 milliards d'années**. Cet âge est considéré comme celui de la formation du Système solaire et de la Terre.

Echelle des temps géologiques

Eon	Ere	Période	Epoque	Plantes et animaux				
Phanérozoïque (vie apparente)	Cénozoïque (vie récente)	Quaternaire	Holocène	Age des Mammifères	Humains			
			Pléistocène					
		Tertiaire	Néogène			Pliocène	Développement des mammifères qui dominèrent la Terre	
						Miocène		
			Paléogène			Oligocène		Extinction des dinosaures et autres espèces
		Eocène						
		Paléocène						
		Mésozoïque (vie moyenne)	Crétacé				Age des Reptiles	Premières plantes à fleurs ; grand développement des dinosaures
						Jurassique		
	Trias							
	Paléozoïque (vie ancienne)		Permien		Age des Amphibiens	Extinction des Trilobites et beaucoup d'autres animaux marins		
				Carbonifère				
				Dévonien				
			Silurien		Age des Poissons	Premiers amphibiens		
				Ordovicien				
				Cambrien				
	Protérozoïque (Début de la vie)	Précambrien		Age des Invertébrés marins	Premiers organismes multicellulaires			
			Archéen					
Hadéen								

Figure 12 : L'échelle des temps géologique